

大深度地下開発の 可能性を探る

——ジオフロントを拓く空間構築技術——

うちは、ほら、ほら、
そとは、すぶ、すぶ。

すさのお 須佐之男が放った野火にまかれた^{おおくにぬし}大国主の前に

一匹の鼠が現れているには、
外からは狭いが内側が広い空洞が土の中にあるという。

鼠に導かれ、空洞に避難した大国主は、
須佐之男の試練を見事切り抜け、
その娘である美しい^{すせり}須勢理姫を手にいれた——
というストーリーが、古事記にある。

大深度地下空間=ジオフロントの開発のテクノロジーとして
国家プロジェクトによって要素技術の開発が行われたジオドームは、
ちょうど外側が「すぶ」で内側が「ほら」になった、
この神話中に出てくる鼠の穴を想起させる巨大な地下空間である。

技術が生み出すこの新たなフロンティアの活用によって、
現代都市がかかえる閉塞状況を乗り越えることが可能になるかもしれないという。
ジオドームの実態と、ジオフロント開発の可能性を探ってみる。

写真：ネットワーク化されたジオドームのイメージ。

大深度利用へ向けての法的整備も進行中 要素技術がそろいつつあるジオフロント開発

公共の目的に限って、民有地を含めた大深度地下を使用することができるようになろうという案が浮上しようとしている。もしこの法案が成立すれば、大深度地下開発へ向けての自由度が大幅に向上することが期待される。また開発技術の面では、昨年、工業技術院の産業科学技術研究開発制度による「大深度地下空間開発技術」が終了し、要素技術がそろいつつある。また鉄道の大深度化のためのあらゆる角度からのノウハウも研究されており、ジオフロントへむけての第一歩がよいよ間近となりつつある。

都市再生への手段として

乗車率250%の通勤電車。渋滞で頻繁に麻痺状態に陥る高速道路。びっしりと埋め尽くされ、土地所有権が交錯して計画的な都市整備が難しい大都市圏空間。とくに首都圏では、こうした飽和状態に、思い切った対策がとれない状況が続いている。

その一方で一部では設備の老朽化は進み、どうやって機能をストップさせることなく都市機能を刷新していくかが重く困難な課題となっている。

せめて新聞が広げられる通勤電車や、一般道路よりは早く目的地へ行ける高速道路を実現することはできないのだろうか。だがそのためには、さらに新たな設備面での拡充が必要となり、そのために必要な時間と用地取得をはじめとするさまざまな調整は容易なことではない。

ジオフロント、すなわち大深度地下空間の開発・利用はこうした前にも横にも行けない現状の都市的飽和を打開するノウハウのひとつとして、きわめて魅力的なアイデアである。首都圏では、どんな種類の開発にせよとびぬけて高い地価の問題に突き当たる。東京の土地の値段を聞いた後に、道路を1本通すためにかかる土地買収の費用を考えると、それが並たいていではなく「金のかかる」事業であることはすぐに納得がいくはずである。費用がかかるだけではない。使用可能な土地そのものが、まともには空いていない。用地を取得しようとすれば、長い年月と多数の手続きが必要になるわけだ。

土地買収にかかるはずの費用と時間を考えると、それを工事費にかけること代替できるならば、そのほうがよりスムーズに事業が具体化できるケースは当然考えられるだろう。

たとえば首都高速の渋滞を解決するには、高速道路の許容量を増やす必要がある。バイパスを建設すればよいわけだが、そのスペースはないから地下につくろうという発想が成立するわけだ。地下高速に一時的に交通をシフトさせておいて、その間に地上の老朽化した高速道路を刷新し、長寿命コンクリ

ートなどで新たな地上の高速を再建する——といった旧設備再建にも大深度開発技術はまたないチャンスを与えてくれるのである。新地上高速は、より現代的な視点で都市景観や環境調和を十分に配慮したものにしていくのもいいだろう。そして現行の機能を停止させずにリニューアルを行ったらその後は、地上と地下に機能分担させ両方を併用していけばよい。

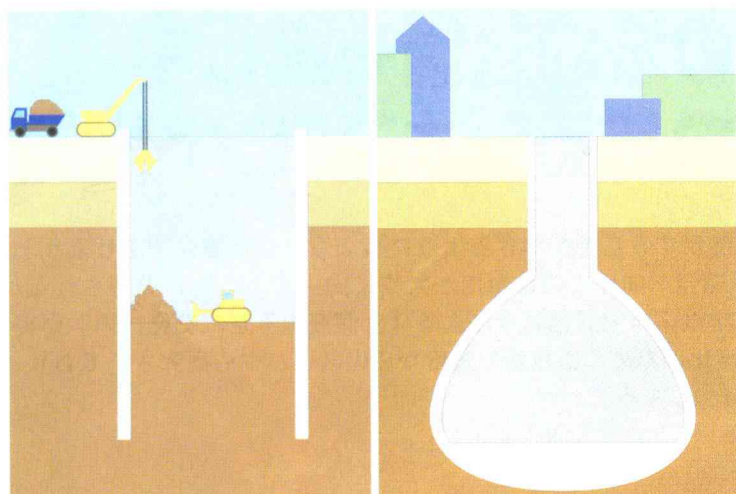
だが従来どおりに浅部の地下で開削工事を行わねばならないとすれば、土地所有者との調整が必要になり、地上での建設に準じた面倒が生じることになる。ならばいっそ地上にはまったく影響をおよぼさない方法で、しかも通常の地下利用（建築などの地下室や基礎など）には影響を与えない大深度を使えば理想的なわけである。

これはいわば都市インフラを時代に合ったものに再生していくための「となりの部屋」として、地下空間を用いようという発想だ。同様に工場や倉庫などといった設備も地下化しながら地上を再生していくことが可能だろう。これらの設備は必ずしも再び地上につくり直す必要はない。開いた土地は、緑化したり住宅にあてたりしてもよいのである。

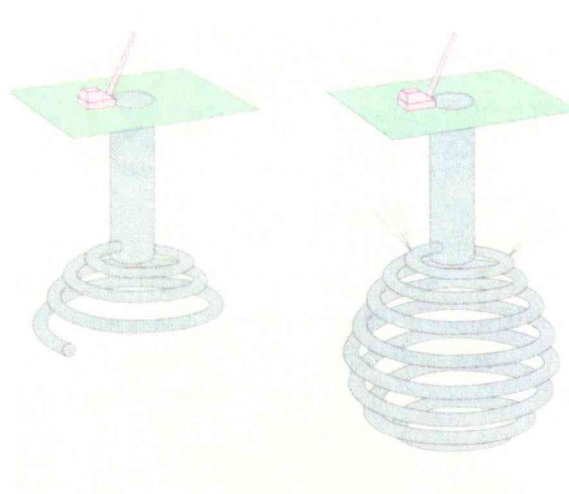
こうしたジオフロントの発想は、アイデアだけをならべていけば、よいことばかりのようにも見えるのだが、現実には当然ながら技術的制約とコスト問題とのせめぎあいの後にはじめて成立する技術であり、コスト面で十分に見合うノウハウが希求されているのである。

バブル時代のジオフロントブームをこえて

ジオフロントの発想は、そもそも1980年代後半以降のバブルの時期、極端なオフィス不足などの打開策として登場してきた。オフィスの賃貸料が高騰し、その価格帯を前提にすれば、たとえ大深度まで掘削してコストをかけても、十分に見合うだろうというそろばん勘定があったようだ。この時期ゼネコン各社は競って大深度地下開発の構想を打ち出し、鉄鋼メーカー、関連省庁などもその輪に加わった。ジオフロント・ブームである。しかしバブルがあっけなく弾けるとオフィス需要は急速に



従来の開削工法では、大量の土砂が排出される。また埋め戻しにも大変な労力が必要になる。ジオドームは開削工法によらない新たな地下空間構築技術として開発された。



スパイラル天盤の構築。

沈静化し、コストのかかる大深度空間の魅力は急速に色褪せてしまったかにみえた。

だが、先に述べたような都市の飽和状態の中で、より実効性のあるインフラ整備や、都市機能の再生という課題に取り組もうとすると、大深度地下開発がやはりきわめて有力な手段のひとつであることは否定できないだろう。ジオフロントのビジョンは、バブルが弾けても今なお生きているといっている。また阪神淡路大震災で地下施設の被害が少なかったことも改めて地下利用の有効性に目を向けさせている。

その証拠にというのもおかしいかもしれないが、昨今、大深度利用への法的整備へむけての動きが活発化してきている。より具体的には1995年に臨時大深度地下利用調査会が首相の諮問機関として誕生しており、来年夏にはその最終答申が発表される予定になっている。この調査会での検討結果をもとに、大深度地下の利用に関する法律が新たに制定されるだろうと予測することができる。

焦点になっているのは、土地所有者が常識的には使用可能性がない大深度地下では、公共利用に限りて使用できるようにしよう——という点である。公共のために個人の土地所有権を制限することにもつながる内容だけに慎重な検討が重ねられている。

これまでは地下鉄などでも、建設にあたっては地上の土地所有者との調整が難しく、事実上道路下にしか線路を敷設できないのが実情だった。地図上で道路と地下鉄の線路が重なっているのには、そうした事情がある。だがもし大深度利用が上記のような方向で法制化されれば、銀座の真ん中でも、住宅地の下でも、鉄道や道路を最短距離で通過させることが可能になるのである。そうなれば、土地買収が難しい都市部中央では大深度地下に道路や鉄道を通し、郊外に行ってから地上を走らせるといった方法が採用できるようになるだろう。公共

利用に限ってのことではあるが、10年がかりといわれる区画整理や土地買収の問題に悩まされずに、インフラ整備ができるようになるということである。したがって都心の一等地で土地買収を行うよりも低いコストで大深度空間が確保できるようになれば、実現の可能性は高いということになる。

国家プロジェクトで開発された空間構築技術

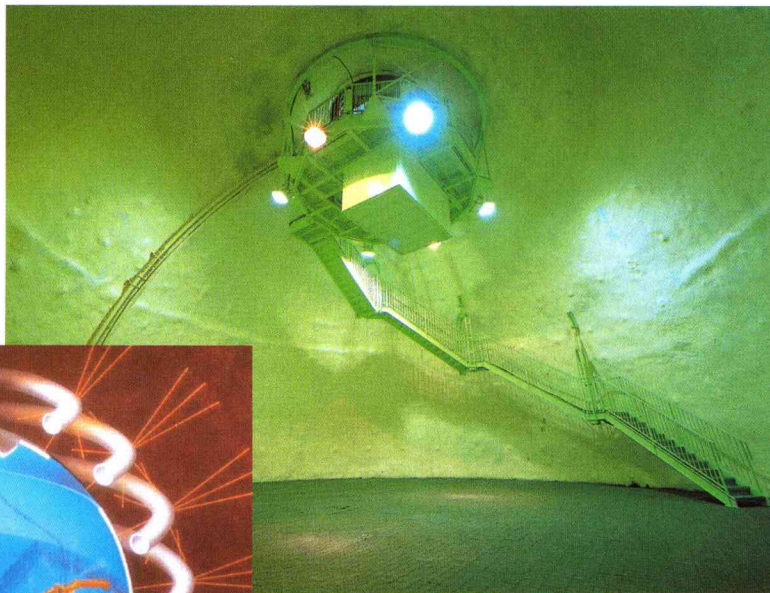
大深度利用が法的側面からより具体的に検討されつつある一方で、利用技術の面はどうなっているのだろうか。大深度地下の特徴は、浅部に比べてより高い土圧、水圧がかかるということである。そうした特殊な環境下で深く掘削していくことを考えると安全にしかもコストをできるだけ抑えて工事を行わねばならない。通常の地下開発では開削工法によって、利用する面積全域にわたって穴を掘る方法をとっている。だが50m以上もの深度にわたって土を掘っていったのでは、掘削土量や埋め戻し土量は大変なものになるし、高い土圧下で開削した空間を保持するにはかなり堅固な構造が必要になる。必然的にコストも高くつくわけだ。

こうした大深度の問題点をクリアーするための技術革新をめざして、通産省工業技術院の産業科学技術研究開発制度（かつての大型プロジェクトを引き継ぐ制度）では、平成元年から8年度までの8年をかけて、施工技術をはじめとする大深度地下開発に必要なさまざまな要素技術開発が行われた。

NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）を通じて（財）エンジニアリング振興協会への委託という形で進められたこのプロジェクトでは、大深度地下空間開発のための4本柱として

- ①高精度地下構造評価技術
- ②大深度地下空間構築技術
- ③大深度地下環境制御・防災技術

ジオドーム工法のイメージ。



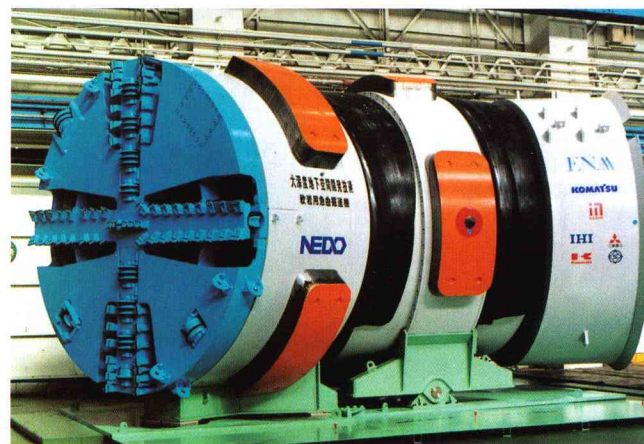
スパイラル天盤の効果を実証するために在来工法で構築されたミニドーム内部(直径20m、高さ12.5m、深度50m)。ジオドームの実物は、今後の実用プラン出現を待たねばならない。

④ トータルシステム・利用技術

といった各項目ごとに研究開発が進められたが、その核芯ともいべきものは、やはり②の大深度地下空間構築技術だろう。プロジェクトにあたっては、いくつかの空間構築技術が検討されたが、最終的に選定されたのは、スパイラル天盤というユニークな構造をもつドーム状の大深度地下空間——ジオドームだった。スパイラル天盤とは、螺旋状に掘ったトンネルを利用した構造を用いて、コイルのようにして掘削前の利用空間をとり囲み補強していくもので、高い土圧を螺旋構造物がその軸方向へと逃がし、空間に直にかからないようにした工法である。このジオドーム工法では、開削口は利用空間の径よりもずっと小さくてすむ。掘削される空間はちょうどプラスコのような形状となる。

螺旋構造は本来ならドーム部分の空間に直にかかる土圧を下方に逃がす働きをするが、このコイル状の構造物からは山岳工法などで用いられるようなロックボルトがヒゲのように延び、それによって土をしっかりとつかむように設計されている。外見上のイメージは植物の球根にとても似ている。地中深くにある丸く大きなかたまりから、細い茎が伸びていて、ロックボルトはあたかもあらゆる方向に張り巡らされた根毛のようだ。

ジオドーム工法では、この細い茎にあたる縦坑をまず開削し、そこからスパイラル天盤のためのトンネル掘進機を発進させる。この目的のために新たに軟岩用急曲掘進機と呼ばれるトンネル

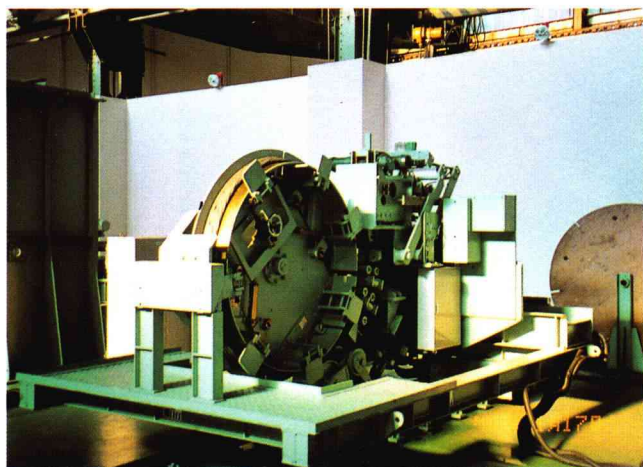


軟岩用急曲掘進機。螺旋を掘り進むそのイメージは巨大な銅鉄のミミズ。

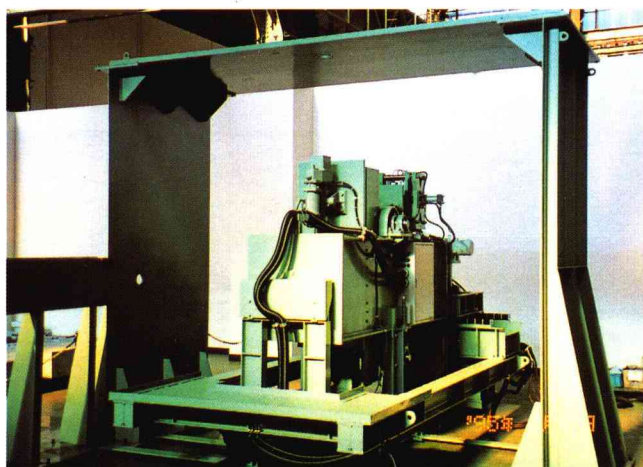


スパイラル・トンネルの内部を固めるスチール・セグメント。ジオドームを支える重要な鉄の技術である。

掘削機が開発された。外見的にはシールド工法などで用いられるトンネル掘進機と岩盤を掘り進むトンネルボーリング機を合体した構造で、エビのような外殻をもちシャクトリ虫かミミズのように屈曲して進めるようにしたもので、3次元急曲トンネ



FRPロックボルト成形機。ロール部分にロックボルトが巻き取られている。

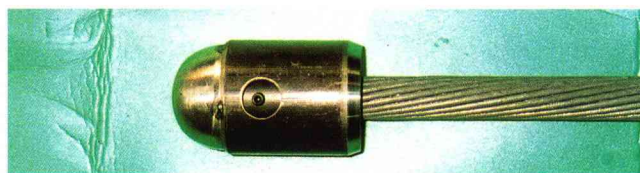


FRPロックボルト固定装置。この装置によりスチール・セグメントにロックボルトを固定していく。

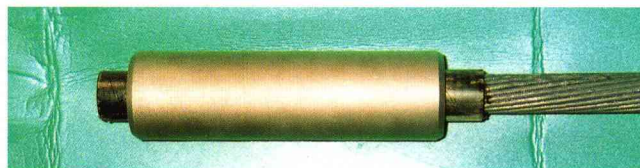
ルを効率的に掘り進むことができるようにパラレルリンクと呼ばれるロボット機構を備え、壁面に反力を得ながら地中深く3次元の計画線に沿って進んでいけるようなシステムになっている。この巨大な鋼鉄のミズによって直径4mの螺旋トンネルを穿ち、同時にスチールセグメントによって、内壁を補強していく。

この直径4mのトンネルから最長で20mというロックボルトを土中に打ち込んでいかねばならない。ロックボルトの素材にはフレキシブルで耐候性に優れ高張力特性を持つFRP（ガラス繊維強化プラスチック）製の現場成形型のものが考案された。ロールに巻き付けたFRP製ロープを打設位置で加工しながら、水圧を使って開けた孔に挿入していき、所定位置に固定するという方法である。

こうして大深度地下の土圧をしっかりと支えるスパイラル天盤構造を先に構築した後、その内部をくりぬいていくわけだが、ジオドームでは、ここでも既存の工法とは異なる発想が採用されている。大深度地下の掘削では、高水圧の地下水流出が予想されるが、ジオドーム工法ではこの地下水をあえて汲み出す



FRPロックボルトの先端金具部分。



スチールセグメント側固定金具部分。

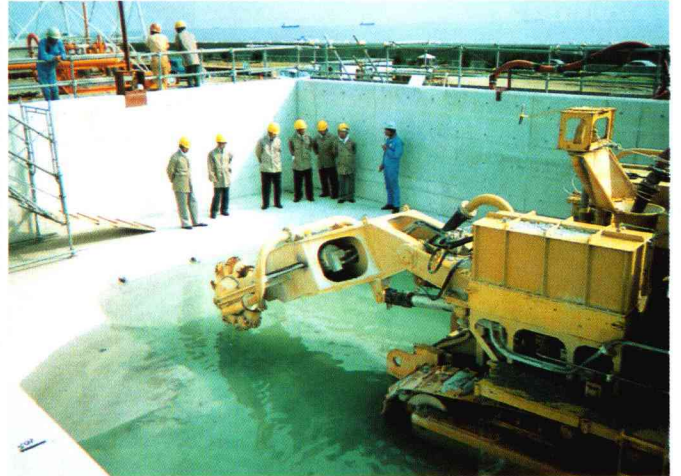


水圧を利用したロックボルト用掘削機（上）とその噴出口（右）。

ことをせず、その水圧を利用しながら地下空間を掘削・固定していく。つまり泥水で満たされたまま所定の形状に掘削し、次に壁面をライニング材で固めていくのである。地下水の水圧を利用することで、落盤を防ぎ安定した作業ができるというわけだ。

プロジェクトでは、水没下で作業を行うために、遠隔操作による水没自動掘削機と水没自動ライニング機とが開発された。それぞれに鋼鉄製の土籠と首長龍とでもいうべきいかつい外見をしている。ともに真っ暗な泥水の中で作業を行うための無人機である。操作は地上からコンピュータ・グラフィックの画面を見ながら行う。

作業手順としては、まずコンピュータ制御された掘削機がドームの円周状に壁面掘削を行うと、それと入れ替えてライニング機が中央に下ろされ、先端に移動型棒が取り付けられたアームを泥の壁面に延ばす。新開発の水中コンクリートをこの型



水没自動掘削機（左）と泥水中での模擬岩掘削試験（右）。



水没自動ライニング機（左）と泥水中での壁面固定試験（右）。

枠に流して壁面を押さえ、固まったらアームを回転させるという繰り返して、一周を固定するのである。こうして水中で少しずつ円周状に掘削と固定を繰り返してゆき、ドーム状の内壁を築いていく。排土はポンプを使って地上まで運ぶ。最後に泥水を汲み上げると、直径50mにもおよぶ大空間が出現するというわけだ。

要素技術として開発されたこれらの機械は、それぞれに模擬環境での実証実験が行われ性能が確認された。軟岩用急曲掘進機は実際の軟岩地盤に投入した実験が行われ、目標とする最小曲率半径7mが自動運転で実証された。FRPロックボルト関連の削孔機、成形機、固定装置、定着剤供給システムなどは模擬トンネル内で実験が行われた。また水没自動掘削機は泥水を満たした大型水槽内での模擬岩掘削によって、自動ライニング機も同様な仮地山での泥壁面の固定試験によって、その性能が確認された。

またスパイラル天盤そのものの有効性を実証する意味では、実際のジオドームよりは小さな、直径20m高さ12.5mという空間（ミニドーム）を既存の工法によって地下82.5mという大深



ライニング機の移動型枠部分。

度に構築し、計測解析によって、たしかに圧力が螺旋の軸方向に、変換されていることが分かり、スパイラル天盤の効果が確認された。

ジオドームの構築技術は、先にあげたプロジェクトの4本柱のうちの大深度地下空間構築技術に当たるが、そのほかのパートでも同様に研究開発が行われ成果が出ている。①の高精度地下構造評価技術では、各種トモグラフィ技術を用いて岩盤内の割れ目や地下水の有無など、地下の状態を1m角単位

で3次元的に推定することが可能なシステムが開発されている。

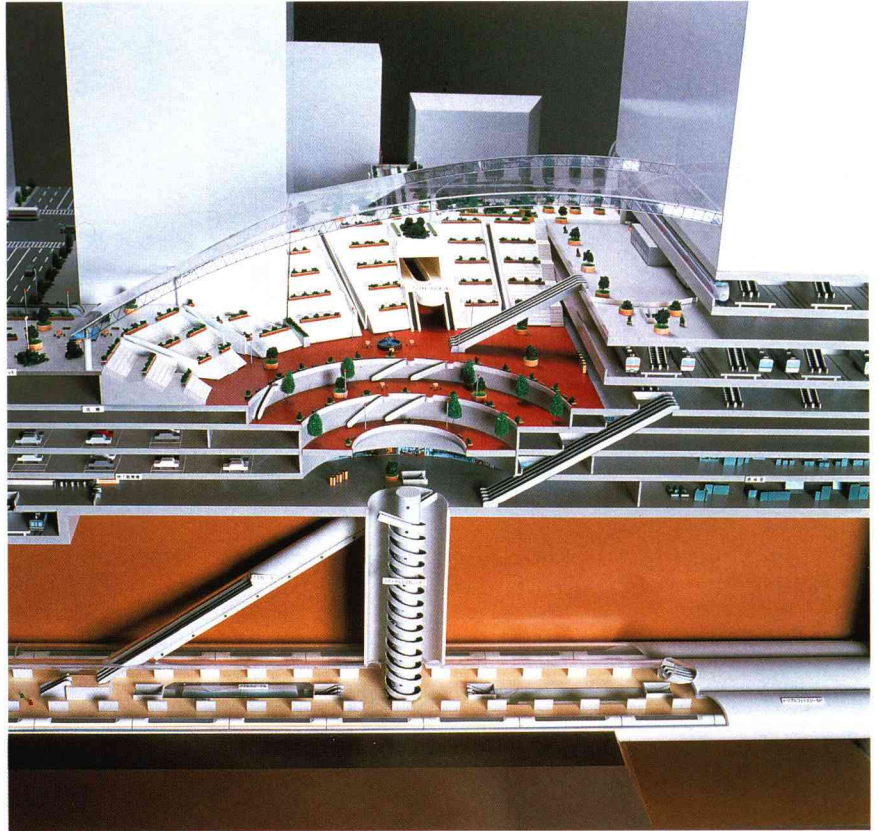
③の環境制御・防災技術では、反射鏡や光ファイバーを用いた採光システムをはじめ、火災などを早期に発見できる高感度なセンサー（異種センサーの組み合わせ）や、漏洩式光ファイバーによる避難誘導システム、地下水対策など、あらゆる面から予想される事態への対策と技術が研究された。

こうして開発された大深度空間としてのジオドームを、まずはどんな用途に適用していくかということが④のトータルシステム・利用技術の開発では検討が行われた。利用可能性としては、地下防災シェルターやアミューズメント施設などさまざまな用途が提案されたが、まず第一に可能性が高いのは、地下の断熱性や保温性を利用した貯蔵設備ではないかと考えられているようだ。90年代に入ってから石油備蓄基地が地下に建設されるようになり、今後はさまざまな貯蔵設備として、もジオドームは有望な地下空間であると考えられる。

地下での人間心理研究も今後の課題

大深度地下の利用にあたっては、人の心理面からも解決すべき問題があるという。たとえば大深度地下空間は、耐震性の面からは地上よりも安全性が高く、防災拠点としても検討されているほどだが、人の心理としては深い土の底にいるという意識は不安や圧迫感として感じられがちである。そうした場所で災害に遭った場合の不安や動揺にどう対処するかということが問題になる。外部光の導入や映像の使用など、解決方法は想定されているものの、医学や心理学など幅広い分野からの研究が将来的には必要とされてくるかもしれないという。「とりかかりは、いきなり万人が利用する施設に適用するのではなく、特定の職員や施設関係者が利用する設備として使ってみて、その経験をもとにより広く利用範囲を広げていけばよいのではないかと考えています」（エンジニアリング振興協会・地下開発利用研究センター研究主幹 古見喜八郎氏）。

ジオドームのような大深度空間は、かならずしも万人が直接利用する施設としなくても、公共に益することは可能である。たとえば清掃工場などの施設を地下化することを考えてみよう。この場合、地下の清掃工場に降りていくのは職業上の訓練を受けた職員であり、一般の人々は深大地下空間を直接に利用することはない。また清掃工場を大深度地下に建設す



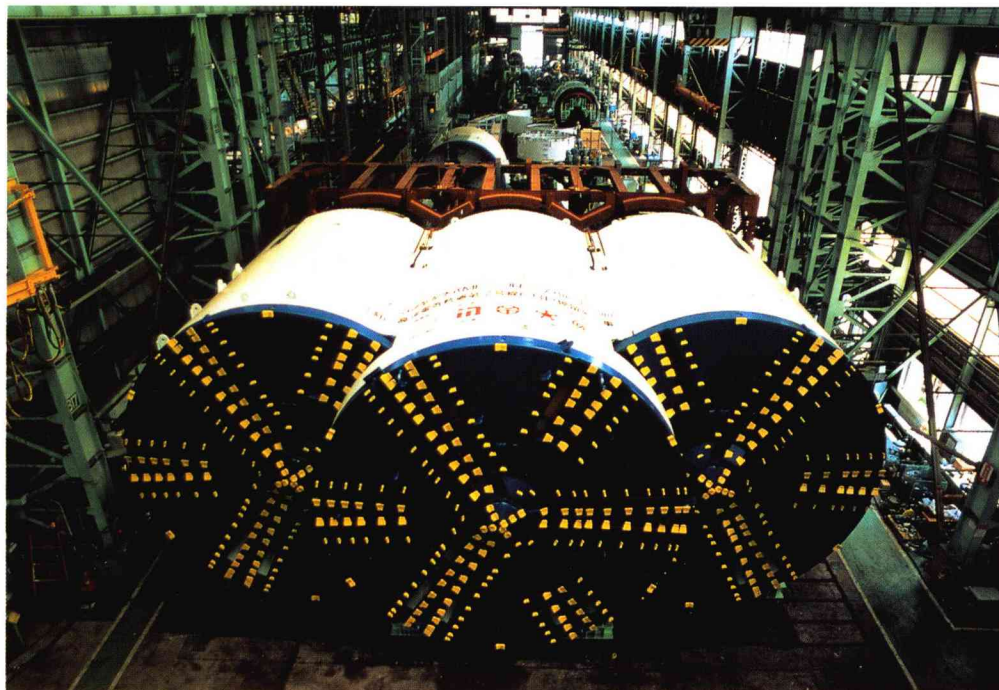
鉄道総合技術研究所が描く大深度地下駅のイメージ（模型）。

る場合、当然ながらコストはハネ上がることになるが、地上を公園とすれば、公園用地取得費用を大深度地下開発費用に転用することによりコストを吸収してしまうこともできる。予算のマジックといえなくもないが、実現するためには、行政の横の連絡が必要になってくる。横の連携が難しい場合もあらかじめ想像されるわけだが、今後に期待したい。

大深度地下空間は、ジオドームのような単独のものから、将来的にはトンネルなどによってネットワーク化されていくことも考えられるが、その場合の残土量はなみたいていではないと考えられる。掘削で出た土のもってゆき場を確保するには、埋め立て地造成などの開発プロジェクトを並行して組み立てていく必要がある。そうしたトータルな視点で計画を立てる意味では、専門の担当省庁が必要だという発想にも頷けるものがある。

進展する大深度交通網実現のためのノウハウ研究

大深度空間をネットワークしていくことを考えた場合、そこに必然的に登場してくるのは大深度道路、大深度鉄道である。このうち鉄道については、現実の地下鉄工事の中にも40m以深というものが登場してきており、シールド工法の進歩によって、かなり可能性が出てきているようだ。今年6月に通達された運輸省の「鉄道構造物等設計標準」でも、これまで浅い地盤を想定したこれまでの設計法に代えてより深い地盤までカバーできる新設計法が採用されるなど、地下での鉄道設計をよ



大阪市営地下鉄7号の駅舎工事に使われた3連泥水式MFシールド。地下30mという深度でプラットフォームを挟んだ両車線を一気に掘削してしまう（鹿島建設株）。

り重視する方向に向かっている傾向もある。

ジオドームのような大深度地下空間をひとつの出発点として、シールド工法などを適用していけば、文頭に述べたような大深度鉄道、あるいは大深度高速道路も技術的には可能になってゆくだろう。そうなれば万人が直接大深度空間を往来することになるわけだ。大深度トンネルは、すでに関門海峡（地下100m）などでも実現しており、50m以深でのトンネル工事は、けっして夢物語ではない。

「大深度での鉄道用シールド・トンネル建設を想定した場合、まず開発しなくてはならないのは、新たなセグメントの技術ではないかと思います。高い水圧と大きな施工時荷重に耐えるセグメントを用意しなくてはならないわけですが、今までの設計方法ではコスト高になってしまいます。深いところの特殊な条件に合わせて設計したローコストなセグメントができてくると、大深度鉄道の可能性はさらに現実的になってくると思います」（鉄道総合技術研究所・構造物技術開発事業部・小西真治氏）。長距離にわたって敷設しなくてはならない鉄道や道路ではセグメントのような要素パーツをいかにローコストで得ることができるかが勝負の分かれ目になってくるということだろうか。たしかに乗車料や通行料が高くなりすぎてしまえば、現実的とはいえない。

大深度地下鉄道の場合、ノウハウ上の大きな焦点となるのが地上からのアクセス方法である。地下50mという距離を不便さを感じさせずにつなぐ工夫が検討されているが、具体的にどのような設備になるのかは絞り切れていないようだ。連続的に人を運ぶためにはエスカレーターが妥当ではあるが、螺旋にするのか真っ直ぐ長いものにするのかなど、さまざまに検討の

余地があるようだ。

大深度の場合、コスト抑制策として駅数を減らすことが考えられるが、その場合ひとつの地下ホームに対し、エスカレーターを2地点の地上口につなぎ、エスカレーター出口をひとつの駅に見立ててひと駅で2駅分の機能を担わせようという案もあるようだ。つまりエスカレーターに中継ぎ交通機関としての役割を担わせてしまおうという発想である。

1軸上に複数のゴンドラが往来できるリニアエレベーターのような中継ぎ交通を用いて、ある程度分散された地上駅から大深度駅まで人を運ぶという方法も実証実験によって、技術的には可能であることが確認されている。

このように大深度地下空間や大深度交通網などの開発技術は、組み替えをするにもあまりに過密になりすぎてしまった都市東京やその他の都市部の再生に、突破口を開くキーテクノロジーになりうる可能性を秘めている。

長引く景気の落ち込みの中で、行革を遅延させても公共事業などによる景気のココ入れが不可欠との論が急浮上している。だが今、求められているのは、たんに有効需要を生み出すためだけの公共投資ではなく、新しい理想に立った、真に役に立つ人間本位の社会資本の創出であり、その未来のための現在の投資によって経済を刺激していくということではないだろうか。大深度地下開発技術のようなひとつの技術的ブレイクスルーがそうした新たな将来のビジョンと関連しあっていくことこそが、こうした時代の閉塞に風穴を開けるきっかけをつくりうるのではないだろうか。そうであることをぜひ期待したい。

取材協力・写真提供：（財）エンジニアリング振興協会、
（財）鉄道総合技術研究所、鹿島建設株